

AValiação DE BACIAS DE DEFLEXÕES RETROANALISADAS PELO PROGRAMA BACKMEDINA (2018)

Guilherme Crepaldi Camarini
Carlos Alberto Prado da Silva Junior
Heliana Barbosa Fontenele
Universidade Estadual de Londrina
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

RESUMO

A avaliação não-destrutiva de pavimentos gera informações essenciais à composição de bancos de dados de sistemas de gerência de pavimentos em diversos países. Em 2018 o programa computacional BackMeDiNa foi lançado para realização de retroanálise de bacias deflectométricas. Diante disso, o objetivo desta pesquisa foi avaliar a consistência dos módulos de resiliência obtidos pelo programa, bem como a sensibilidade de seus resultados aos módulos fornecidos no início do processo iterativo. Para tanto, utilizando o BackMeDiNa, foram retroanalizadas bacias deflectométricas obtidas por equipamento FWD de dois segmentos homogêneos da BR-153, no Estado do Paraná. O programa apresentou baixa sensibilidade aos módulos de resiliência iniciais fornecidos (*seed moduli*). Das 30 bacias retroanalizadas, 21 apresentaram erros de convergência aceitáveis. Ao final, as análises de múltiplas camadas elásticas do programa demonstraram-se similares àquelas geradas pelo programa WESLEA, considerando as bacias teóricas calculadas.

ABSTRACT

Nondestructive testing of pavements provides essential information to compose databases of pavement management systems in several countries. In 2018, BackMeDiNa software was launched to perform retroanalysis of deflection basins. Thus, the purpose of this research was to evaluate the consistency of the resilient modulus obtained through the software, as well as the sensitivity of its results to the resilient modulus provided at the beginning of the iterative process. For this purpose, deflectometric basins obtained by FWD equipment from two homogeneous segments at BR-153, in Paraná, were backcalculated using BackMeDiNa. The software showed low sensitivity to the seed resilient moduli (*seed moduli*). Among the 30 backcalculated basins, 21 presented acceptable convergence errors. At the end, multiple-layer analyzes of the program were similar to those generated by the software WESLEA, considering the theoretical basins calculated.

1. INTRODUÇÃO

A avaliação estrutural de pavimentos em serviço é uma atividade fundamental de um sistema de gerência de pavimentos, tanto para mensurar a vida útil remanescente e seu desempenho, como para definição de atividades de manutenção e restauração adequadas e o momento necessário para tal.

É imprescindível que o corpo técnico das agências de transportes possua conhecimento das propriedades estruturais dos pavimentos para obtenção de repostas estruturais críticas (tensões, deformações e deslocamentos). Essas propriedades são a espessura das camadas, os módulos de elasticidade e os coeficientes de Poisson, e podem ser obtidas por meio de avaliações destrutivas e não-destrutivas (Saltan *et al.*, 2012).

As técnicas destrutivas envolvem a extração de amostras do pavimento por meio de sondagem e a determinação das propriedades estruturais a partir de ensaios em laboratório. Por outro lado, as técnicas não-destrutivas, entre elas a Viga Benkelman e o *Falling Weight Deflectometer* (FWD), têm potencial para determinação das propriedades *in loco*, sem coleta de corpos de prova e, conseqüentemente, sem a necessidade de intervenções no pavimento em serviço (Saltan *et al.*, 2012).

As informações geradas pelo equipamento FWD compõe parte essencial do banco de dados dos

sistemas de gerência de diversos países (Rakesh *et al.*, 2006). Trata-se de um deflectômetro de impacto capaz de aplicar cargas impulsivas ao pavimento, que simulam cargas de roda do semi-eixo padrão a velocidades da ordem de 70 km/h (DNIT, 2006).

Quando a carga momentânea do FWD é aplicada, o formato da condição deformada do pavimento é chamado de bacia de deflexão. Conhecendo os deslocamentos desta bacia, o valor da carga aplicada, condições ambientais no momento do ensaio e as espessuras das camadas, é possível estimar a rigidez das camadas, expressa pelo módulo de elasticidade (NCHRP, 2004; LTPP, 2006).

Os módulos de elasticidades estimados por meio das bacias deflectométricas, segundo a (ASTM, 2015), dependem do equipamento de ensaio não-destrutivo utilizado, da magnitude e frequência da carga, da temperatura no momento do teste e de outras condições ambientais específicas.

No procedimento de avaliação estrutural com o FWD, as variáveis conhecidas são as condições ambientais, as cargas aplicadas e o formato da bacia medida. As variáveis desconhecidas são as propriedades estruturais das camadas do pavimento. A determinação desses parâmetros estruturais em função das respostas estruturais (bacias de deflexões) medidas pelos sensores do equipamento é uma análise inversa, chamada de retroanálise, que é um dos métodos mais comuns utilizados para obter propriedades elásticas das camadas de um pavimento e de sua fundação (Saltan *et al.*, 2012). A retroanálise dos módulos de elasticidade foi utilizada no processo de calibração global do software *AASHTOWare Pavement ME Design* (AASHTO, 2015).

Diversas técnicas de retroanálise vêm sendo aplicadas, porém nenhuma foi comprovada no sentido de produzir os melhores resultados (Kargah-Ostadi e Stoffels, 2015). De acordo com Rakesh *et al.* (2005) elas diferem entre si pelo método de cálculo das respostas estruturais (teoria da elasticidade ou método dos elementos finitos), critério de convergência entre a bacia teórica e a real, a necessidade de módulos iniciais de elasticidade (*seed moduli*) ou faixas de valores de módulos.

Atualmente pode-se distinguir os seguintes métodos de retroanálise: iterativo, busca em base de dados de bacias, método simplificado e equações de análise de regressão não-linear. O método iterativo para obtenção do comportamento elástico das camadas depende de valores iniciais de módulos de elasticidade para calcular, utilizando a teoria das múltiplas camadas elásticas, as deflexões em pontos afastados axialmente do ponto de aplicação de carga. Essas bacias calculadas são comparadas com as bacias medidas com FWD, por meio do computo dos erros entre elas. O processo se repete, alterando os valores dos módulos, até que um erro aceitável seja alcançado, ou até um número máximo de iterações (ASTM, 2015).

Uma vez que quanto mais afastado o ponto de leitura de deflexão do ponto de aplicação de carga, menos camadas influenciarão na resposta estrutural, o processo iterativo de retroanálise ocorre no sentido do subleito ao revestimento, buscando igualdade com a bacia medida a partir das deflexões mais afastadas seguindo no sentido do ponto de aplicação da carga. Considera-se um processo análogo a um sistema de equações lineares de matriz triangular (DNIT, 2006).

A retroanálise é apontada por Terzi *et al.* (2012) como um processo trabalhoso que, pela falta

de consenso e padronização no tocante à interpretação dos resultados, pode-se tornar altamente dependente do especialista que o está realizando.

Além disso, muitos fatores que vêm sendo estudados podem causar falta de acurácia na determinação dos módulos de elasticidade por retroanálise. Elshaer *et al.* (2017) afirmam que o módulo de resiliência das camadas compostas por solos pode variar significativamente com mudanças no teor de umidade, índice de plasticidade, densidade e nível de tensão.

Outras características do pavimento em serviço têm potencial para invalidar as hipóteses de linearidade elástica, homogeneidade e isotropia dos materiais. É o caso das variações das espessuras das camadas e densidades dos materiais, frutos de falhas executivas e de atividades de manutenção; irregularidades superficiais e trincas (NCHRP, 2004).

É possível realizar a retroanálise manualmente, utilizando algum programa de análise linear elástica de sistemas de múltiplas camadas para calcular as respostas estruturais, como o ELSYM5, o WESLEA, o JULEA, o EVERSTRESS, entre outros. Porém, o processo manual pode ser laborioso e consumir muitos recursos até obtenção de resultados aceitáveis. Programas computacionais vêm sendo desenvolvidos para otimizar o processo, entre eles o ELMOD (Dynatest), o EVERCALC (Washington State DOT), o MODCOMP (Cornell University) e o MODULUS (Texas A&M University) (Irwin, 2002).

Apesar de alguns softwares serem similares, eles podem gerar resultados diferentes, ainda que ligeiramente. Isto ocorre devido às variações nos algoritmos de iteração e no cálculo das respostas estruturais, diferentes hipóteses assumidas e quantidade de variáveis que utiliza (NCHRP, 2004).

Em abril de 2018, foi publicado no *website* do Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR) o *software* de retroanálise BackMeDiNa versão 1.1, por meio do Projeto DNIT TED n°682/2014. O programa pode retroanalisar uma estrutura de até 5 camadas, além do subleito, considerando bacias com até 9 pontos de deflexões medidas em campo com equipamento FWD.

O BackMeDiNa aplica o método iterativo para obter os módulos de resiliência das camadas, utilizando o módulo AEMC (Análise Elástica de Múltiplas Camadas), a partir de dados iniciais fornecidos: coeficientes de Poisson, espessuras, condições de aderência entre as camadas e módulos de resiliência iniciais (*seed moduli*). A consistência da análise é verificada pela raiz média quadrática das diferenças entre a bacia medida e a calculada por análise elástica linear. (Franco e Motta, 2018).

Tendo em vista que o programa BackMeDiNa é novo no mercado e na comunidade científica, o objetivo desta pesquisa é avaliar a consistência dos módulos de resiliência obtidos com o programa, bem como a sensibilidade de seus resultados aos módulos de resiliência fornecidos no início do processo iterativo.

2. MÉTODO

Neste tópico é apresentado o método utilizado para o desenvolvimento da pesquisa. Mediante os dados da estrutura real do pavimento da BR-153, relativos às espessuras e composições das camadas, bem como das bacias deflectométricas de dois subtrechos homogêneos do lote 1 do Anel de Integração do Paraná, foram determinados os módulos de resiliência, por meio de

retroanálise iterativa, utilizando o software BackMeDiNa.

2.1. Caracterização das amostras de bacias de deflexões

O Lote 1 do Anel de Integração do Paraná, objeto de estudo deste trabalho, conta com 340,77 km de rodovias. Para o desenvolvimento da pesquisa foram utilizados apenas os dados do subtrecho mais próximo ao posto de pesagem (PPV02) no km 5 da BR-153, no município de Jacarezinho.

Para a retroanálise no BackMeDiNa, é necessário que se forneça como dados de entrada as bacias deflectométricas, as espessuras, os coeficientes de Poisson e as estimativas iniciais dos módulos de resiliência das camadas.

O relatório referente às investigações realizadas para obras de restauração do pavimento continha dados de 12 furos de sondagens. Dessa forma, o trecho ficou subdividido em 12 subtrechos de estruturas equivalentes. Foram consideradas as estruturas do terceiro furo e do sétimo furo, correspondentes às faixas adicionais dos subtrechos do km 23,280 ao km 24,040 e do km 30,680 ao km 31,040, denominados, nesta pesquisa, de subtrechos A e B, respectivamente. As informações das espessuras e materiais componentes das estruturas estão apresentadas nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1: Estrutura do pavimento no subtrecho A

Camadas	Espessura (cm)	Material
1	9,00	CBUQ
2	14,00	Brita graduada
3	30,00	Solo estabilizado granulometricamente*
Subleito	∞	-

Nota: * Solo selecionado, sem correção granulométrica, estabilizado por compactação.

Tabela 2: Estrutura do pavimento no subtrecho B

Camadas	Espessura (cm)	Material
1	11,00	CBUQ
2	14,00	Brita graduada
3	30,00	Solo estabilizado granulometricamente*
Subleito	∞	-

Nota: * Solo selecionado, sem correção granulométrica, estabilizado por compactação.

O levantamento deflectométrico foi realizado a cada 40,0 metros com a utilização do equipamento FWD. Nas Tabelas 3 e 4 são apresentadas as bacias de deflexões das faixas adicionais dos dois subtrechos homogêneos considerados nesta pesquisa, bem como a análise estatística descritiva das amostras.

2.2. Seleção dos módulos de resiliência iniciais

A norma ASTM – D5858/15 (*Standard Guide for Calculating In Situ Equivalent Elastic Moduli of Pavement Materials Using Layered Elastic Theory*) faz um alerta para a seleção dos módulos de elasticidade, que serão utilizados como dados iniciais nos métodos iterativos de retroanálise. Segundo o documento, estes dados podem afetar os módulos de elasticidade finais, e possivelmente falhar ao não encontrar uma solução que esteja dentro dos limites de tolerância dos erros entre a bacia deflectométrica medida em campo e a retroanalizada.

Tabela 3: Bacias de deflexões do subtrecho homogêneo A.

km	Carga (kN)	Bacias de Deflexões (µm)						
		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
		0 cm	20 cm	30 cm	45 cm	65 cm	90 cm	120 cm
23+280	39,1	398	254	160	100	53	37	31
23+320	38,8	459	282	172	102	48	36	29
23+360	39,6	346	250	166	107	53	34	28
23+400	39,3	291	196	131	88	43	21	18
23+440	40,5	171	116	84	64	43	28	24
23+480	39,6	253	177	127	90	50	34	27
23+520	38,4	605	338	214	138	68	41	28
23+560	39,5	400	288	212	157	94	54	41
23+600	39,5	436	299	213	147	81	43	31
23+640	39,0	471	299	205	137	70	42	32
23+680	39,4	236	163	112	81	47	30	23
23+720	39,1	341	234	168	118	62	30	21
23+760	38,4	491	273	164	104	47	28	24
23+800	39,4	336	235	169	119	61	34	26
23+840	39,2	406	258	166	104	48	22	21
23+880	39,2	330	215	141	93	44	26	22
23+920	38,6	408	276	189	129	68	35	30
23+960	39,7	390	256	177	129	73	42	28
24+000	38,7	407	264	170	115	60	35	28
24+040	38,8	517	344	196	119	57	35	27
Coefficiente de variação (%)	1,3	26,5	22,6	20,8	20,8	23,6	22,7	18,7

Nota: Temperatura do pavimento 28°C e temperatura do ar 20°C, no momento do ensaio.

Tabela 4: Bacias de deflexões do subtrecho homogêneo B.

km	Carga (kN)	Bacias de Deflexões (µm)						
		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
		0 cm	20 cm	30 cm	45 cm	65 cm	90 cm	120 cm
30+680	38,4	593	412	275	187	98	59	47
30+720	38,8	472	327	215	145	85	57	42
30+760	38,7	491	351	265	200	121	79	60
30+800	38,6	559	406	295	211	120	69	55
30+840	38,9	487	354	259	189	109	70	54
30+880	38,7	554	390	270	183	97	63	46
30+920	39,2	423	302	215	151	80	49	40
30+960	39,4	424	296	215	149	77	46	39
31+000	38,6	558	335	233	156	82	52	41
31+040	39,1	405	275	198	141	81	52	43
Coefficiente de variação (%)	0,8	13,4	13,7	13,4	14,9	17,6	17,7	15,5

Nota: Temperatura do pavimento 29°C e temperatura do ar 21°C, no momento do ensaio.

Para verificar a sensibilidade dos módulos finais da retroanálise aos módulos iniciais fornecidos ao programa BackMeDiNa, foram definidas 9 composições de módulos de elasticidade iniciais das camadas para a estrutura do pavimento do subtrecho homogêneo 3, considerando 10 bacias do km 23,280 ao km 23,640. Essas bacias foram retroanalisadas para cada uma das 9 composições, totalizando 90 retroanálises.

Para a análise em questão, foram criadas faixas de valores de módulos, tendo como referências centrais os valores *default* do programa BackMeDiNa. As amplitudes das faixas criadas basearam-se nos valores mínimos e máximos recomendados pela LTPP (2006) e ASTM (2015), com exceção do limite máximo do módulo do CBUQ, para o qual foi atribuído um valor próximo ao limite superior obtido por Albernaz *et al.* (2003). Também foram considerados os valores de módulos obtidos por Kargah-Ostadi e Stoffels (2015) e Rodrigues (2007). Os valores de coeficiente de Poisson utilizados nas simulações foram os mesmos utilizados por Koshigoe *et al.* (2019).

Os módulos de resiliência foram variados localmente para cada camada, mantendo-se fixos os valores *default* das demais camadas, para compor as 9 estruturas da Tabela 5, denominadas Composição 1, 2...9 (C1, C2...C9). As composições C1 e C3 representam as variações entre os valores extremos do módulo do revestimento. C4 e C5 são referentes às variações no módulo da base, C6 e C7, da sub-base e, C8 e C9, do subleito. A composição C2 representa a própria referência central.

Tabela 5: Composições de módulos de resiliências das camadas

Composições	Módulo de Resiliência das Camadas (MPa)			
	1	2	3	Subleito
C1	1500	400	200	100
C2 (referência)	5000	400	200	100
C3	8500	400	200	100
C4	5000	120	200	100
C5	5000	680	200	100
C6	5000	400	60	100
C7	5000	400	340	100
C8	5000	400	200	30
C9	5000	400	200	170

Para avaliar o efeito das variações dos módulos de resiliência iniciais nos módulos finais, foram calculadas, pela Equação 1, as raízes quadráticas médias dos erros percentuais (*Root Mean Square Error – RMSE*) em relação ao pavimento composto pelos valores *default* dos módulos, composição C2.

$$RMSE = 100 \times \left\{ 1/n \times \sum_{i=1}^n [(MR_{Ci} - MR_{C2})/MR_{C2}]^2 \right\}^{0,5} \quad (1)$$

Em que n : número de bacias analisadas (10);
 MR_{Ci} : módulo de resiliência da camada para a composição em análise (MPa);
 MR_{C2} : módulo de resiliência da camada para a composição C2 (MPa).

2.3. Retroanálises no BackMeDiNa

Definida a composição mais adequada de módulos de resiliência iniciais, as 30 bacias de deflexões do FWD (Tabela 3 e Tabela 4) foram retroanalisadas utilizando o programa

BackMeDiNa versão 1.1.

Para conseguir resultados satisfatórios, é necessário que o operador do programa acione algumas vezes o comando de retroanálise até que se obtenha uma bacia de deflexões teórica próxima à bacia medida com o FWD. Pela Equação 2 (raiz do valor quadrático médio das diferenças) a proximidade entre as bacias é medida ponto a ponto.

$$RMS = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_{calc.i} - d_{med.i})^2 \right]^{0,5} \quad (2)$$

Em que n : número de pontos de deflexão na bacia ou número de sensores do FWD (7);
 $d_{calc.i}$: deflexão calculada no sensor i (μm);
 $d_{med.i}$: deflexão medida em campo no sensor i (μm).

O manual do software recomenda que RMS menores do que 5 μm sejam considerados como uma boa correlação entre a bacia medida com FWD e a calculada. Nesta pesquisa, foram realizadas tantas iterações quanto necessárias até a estabilização do erro calculado pelo programa.

Por ser uma medida de erro considerada pela norma norte-americana ASTM – D5858/15, também foi calculada, pela Equação 3, as raízes quadráticas médias dos erros percentuais (RMSE). A norma recomenda valores de RMSE entre 1 a 2%.

$$RMSE = 100 \times \left\{ \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n [(d_{calc.i} - d_{med.i})/d_{med.i}]^2 \right\}^{0,5} \quad (3)$$

Em que n : número de pontos de deflexão na bacia ou número de sensores do FWD (7);
 $d_{calc.i}$: deflexão calculada no sensor i (μm);
 $d_{med.i}$: deflexão medida em campo no sensor i (μm).

2.4. Verificação das bacias retroanalizadas com o programa WESLEA

A terceira etapa desta pesquisa consistiu na simulação das 30 bacias de deflexões no programa WESLEA, utilizando os módulos de resiliência obtidos por retroanálise no BackMeDiNa. O WESLEA é um programa para cálculo das respostas estruturas de um sistema de múltiplas camadas, por meio de análise linear elástica que, diferentemente do BackMeDiNa, não contempla algoritmos para realização de processo iterativo na obtenção dos módulos de resiliência das camadas.

Para esta pesquisa, as informações fornecidas ao programa WESLEA foram as seguintes:

- Carregamentos: para criar uma correspondência com o efeito da carga do FWD, foi selecionado o Eixo Simples de Rodagem Simples, por representar apenas uma carga de roda no semi-eixo, correspondendo a carga da placa. Foram introduzidas as mesmas cargas aplicadas pelo FWD em cada bacia. As pressões informadas ao programa foram calculadas, considerando uma área de contato circular de 30 cm de diâmetro.
- Estrutura: as espessuras das camadas foram as das Tabelas 1 e 2, os coeficientes de Poisson foram os mesmos de Koshigoe *et al.* (2019) e os módulos de resiliência foram aqueles obtidos por retroanálise no BackMeDiNa. Todas as camadas foram consideradas totalmente aderidas às adjacentes.
- Coordenadas das respostas: para obtenção das bacias deflectométricas foi necessário criar pontos de leitura dos deslocamentos na superfície da primeira camada, correspondentes aos

espaçamentos dos 7 geofones do FWD.

Ao final, para comparar as bacias de deflexões calculadas pelo BackMeDiNa com as obtidas no WESLEA, para as mesmas composições de módulos de resiliência, foram calculados os RMSE das 30 bacias, pela Equação 3.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Seleção dos módulos iniciais (*seed moduli*)

Na Tabela 6, são apresentadas as raízes quadráticas médias dos erros percentuais em cada composição, para as 3 camadas e o subleito. Esses valores foram calculados a partir dos desvios entre os módulos de resiliência obtidos no BackMeDiNa para a Composição 2, tratada como composição de referência, e os módulos obtidos para cada uma das demais composições.

Tabela 6: Raízes quadráticas médias percentuais entre os módulos para cada composição

Composição	RMSE das camadas (%)			
	Camada 1	Camada 2	Camada 3	Subleito
C1	2,873	2,916	2,027	0,803
C2	0,000	0,000	0,000	0,000
C3	2,979	3,453	2,221	0,335
C4	2,830	5,057	4,517	0,801
C5	3,531	5,079	3,017	1,114
C6	3,230	3,875	1,761	0,701
C7	1,788	3,922	3,776	0,621
C8	3,838	6,293	5,360	0,632
C9	3,765	5,538	3,099	1,220

Pode-se observar que em todas as composições consideradas, os erros percentuais entre os módulos de resiliência retroanalizados foi pequeno. A sub-base foi a camada mais sensível aos módulos iniciais, atingindo alguns erros superiores a 5%. Por outro lado, os módulos finais do subleito demonstraram-se praticamente insensíveis aos módulos “sementes”, ou seja, aqueles fornecidos no início do processo de retroanálise.

Diante do exposto, visto que o processo iterativo de retroanálise do BackMeDiNa independe dos módulos sementes para obter valores aproximados de módulos de resiliência calculados, para a próxima etapa da pesquisa foram selecionados os valores *default* do programa (C2) para iniciar as retroanálises das 30 bacias amostrais.

4.2. Resultados das retroanálises no BackMeDiNa

Na Tabela 7, são apresentados os módulos de resiliência resultantes das bacias de deflexões do subtrecho A, a partir das retroanálises no programa BackMeDiNa. Na Tabela 8, estão os resultados do subtrecho B.

As bacias foram retroanalizadas uma a uma, obtendo-se, então, módulos de resiliência das camadas diferentes para cada ponto de ensaio do FWD. Optou-se por não utilizar valores médios, nem deflexões características, pois, apesar de serem tratados como segmentos homogêneos, tanto as deflexões nos 7 pontos da bacia como os módulos de resiliência

apresentaram alta variabilidade nos dados, atingindo valores de coeficientes de variação da ordem de 50%.

Como pode ser observado nas penúltimas colunas das Tabelas 7 e 8, das 30 bacias analisadas, 21 delas apresentaram valores de RMS aceitáveis, considerando que o manual do programa recomenda valores menores que $5 \mu\text{m}$. Entretanto, nenhuma das bacias de deflexões calculadas pelo programa enquadrou-se dentro dos limites de tolerância dos valores de RMSE recomendados pela ASTM – D5858/15. A mesma norma afirma que se os limites de erros não puderem ser atingidos, existem condições que violam as hipóteses de linearidade elástica ou as espessuras das camadas assumidas.

Alguns valores elevados de desvios entre a bacia teórica e a medida em campo podem ser explicados pelas condições locais do pavimento que violam as hipóteses assumidas pela Teoria das Múltiplas Camadas Elásticas. Xie *et al.* (2015) concluíram em sua pesquisa que trincas na camada asfáltica podem resultar em bacias de deflexões medidas com formato incomum, impactando na convergência com as bacias teóricas calculadas. Os autores também concluíram que a heterogeneidade dos materiais do pavimento real pode aumentar os erros calculados e gerar módulos de resiliência incorretos. Isto também pode explicar os altos valores de coeficientes de variação dos módulos de resiliência retroanalisados, considerando que as condições de integridade do pavimento podem alterar em cada ponto de ensaio.

Os coeficientes de variação mais elevados foram os calculados para as 3 primeiras camadas, sendo que os módulos do subleito apresentaram maior homogeneidade. Irwin (2002) explica que ao considerar que o subleito é um semi-espaço infinito, em situações locais em que existam camadas rochosas ou de argilas rígidas a poucos metros de sua superfície, os módulos retroanalisados podem resultar em valores incorretos para as camadas superiores. O programa BackMeDiNa está exposto a esses erros, uma vez que não é possível considerar a profundidade de camada rígida abaixo do subleito. No programa, a espessura máxima das camadas é limitada a 75 centímetros. A consideração da profundidade de camada rígida é possível, por exemplo, em programas como o ELMOD e o EVERCALC.

4.3. Comparação entre as bacias retroanalisadas com as calculadas pelo WESLEA

Neste tópico, é apresentada uma comparação entre as bacias teóricas calculadas durante o processo de retroanálise e as bacias teóricas calculadas pelo programa WESLEA, considerando os mesmos módulos de resiliência obtidos no BackMeDiNa. A comparação foi realizada por meio do cálculo do RMSE (Equação 3) e os resultados dos erros entre as 30 bacias analisadas estão contemplados na Tabela 9.

As bacias de deflexões obtidas com o WESLEA apresentaram desvios irrisórios em relação às bacias calculadas por retroanálise no BackMeDiNa. Assim, é possível concluir que o componente de Análise Elástica de Múltiplas Camadas (AEMC) apresenta valores de respostas estruturais similares aos calculados pelo WESLEA. Os pequenos desvios observados podem ser consequência de diferentes arredondamentos numéricos considerados pelos dois programas.

Tabela 7: Módulos de resiliência por retroanálise do subtrecho A

Km	Módulo de Resiliência (MPa)				RMS (μm)	RMSE (%)
	CBUQ	Brita graduada	Argila arenosa	Subleito		
23+280	2914	140	240	278	4,02	4,29
23+320	2309	127	176	300	4,39	5,11
23+360	5884	140	173	317	4,63	4,11
23+400	5098	275	177	411	3,89	6,74
23+440	6498	685	561	391	2,07	4,75
23+480	5614	455	220	333	2,65	4,41
23+520	1045	160	119	230	5,06	4,15
23+560	3905	353	115	200	4,38	4,45
23+600	2371	400	87	246	3,66	3,46
23+640	1928	268	108	245	3,80	3,74
23+680	4874	544	239	368	2,73	3,01
23+720	2147	746	79	375	3,36	5,67
23+760	925	266	119	336	5,28	6,19
23+800	3217	574	95	333	3,53	5,69
23+840	2074	329	102	394	4,28	9,20
23+880	2988	360	144	388	3,76	5,98
23+920	2363	386	93	283	4,61	7,09
23+960	1397	617	106	272	4,61	3,34
24+000	2220	289	129	286	5,30	4,87
24+040	2876	65	190	279	9,99	5,81
Média	3132,35	358,95	163,60	313,25	4,30	5,10
Coefficiente de variação (%)	52,39	54,24	64,96	19,48	37,02	29,21

Tabela 8: Módulos de resiliência por retroanálise do subtrecho B

Km	Módulos de Resiliência (MPa)				RMS (μm)	RMSE (%)
	CBUQ	Brita graduada	Argila arenosa	Subleito		
30+680	1802	92	100	173	7,81	3,99
30+720	2301	77	233	191	6,38	3,45
30+760	1626	360	86	147	4,83	3,61
30+800	2063	180	72	156	6,11	4,92
30+840	2373	200	98	161	5,45	3,56
30+880	2150	92	110	173	5,99	2,83
30+920	2960	154	122	219	4,97	4,50
30+960	3080	119	143	222	4,90	5,51
31+000	849	229	103	200	4,60	4,13
31+040	2447	177	173	205	4,33	4,38
Média	2165,10	168,00	124,00	184,70	5,54	4,09
Coefficiente de variação (%)	29,91	50,30	38,66	14,36	19,04	19,08

Tabela 9: Comparação entre as bacias deflectométricas do BackMeDiNa *versus* WESLEA

km	RMSE (%)	km	RMSE (%)
23+280	0,151	23+880	0,000
23+320	0,135	23+920	0,253
23+360	0,000	23+960	0,584
23+400	0,000	24+000	0,146
23+440	0,326	24+040	0,000
23+480	0,568	30+680	0,127
23+520	0,127	30+720	0,118
23+560	0,346	30+760	0,499
23+600	0,000	30+800	0,141
23+640	0,263	30+840	0,078
23+680	0,320	30+880	0,120
23+720	0,000	30+920	0,155
23+760	0,279	30+960	0,213
23+800	0,472	31+000	0,382
23+840	0,263	31+040	0,707

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A proposta do experimento dessa pesquisa foi de avaliar a consistência do programa BackMeDiNa em calcular bacias de deflexões, por retroanálise dos módulos de resiliência. Na avaliação, foram consideradas as raízes quadráticas médias dos erros absolutos e percentuais. Complementarmente, foi analisada a sensibilidade dos módulos finais aos módulos fornecidos pelo usuário no início do processo iterativo (*seed moduli*). Ao final, os módulos de resiliência obtidos por retroanálise no BackMeDiNa foram testados no WESLEA, por meio do cálculo das raízes quadráticas médias dos erros percentuais entre as bacias deflectométricas calculadas pelos dois programas.

A partir dos resultados desta pesquisa, é possível tecer as seguintes considerações:

- Apesar das retroanálises não atingirem valores aceitáveis de RMSE, deve-se levar em conta que a análise foi realizada para um pavimento que está na eminência de ser restaurado e que possivelmente apresenta condições de deterioração que violam as hipóteses da linearidade elástica. Além disso, as altas variabilidades entre os módulos de resiliência calculados para cada bacia de deflexão podem ser explicadas pela existência de falhas localizadas, como trincas, variações de espessuras das camadas e densidades dos materiais. Diante disso, sugere-se experimento futuro que compare a análise linear do programa BackMeDiNa com outros programas que adotam métodos de análises não-lineares.
- No programa BackMeDiNa, não há opção para fornecer informações sobre uma possível camada rígida existente abaixo do subleito. Segundo a literatura, isto pode gerar valores incorretos de módulos de resiliência, principalmente para as camadas mais superficiais. Nesse sentido, sugere-se que em experimento futuro essa possibilidade seja melhor avaliada comparando-se os resultados do BackMeDiNa com os módulos de resiliência obtidos em laboratório e em outros programas, como EVERCALC e ELMOD, que consideram informações sobre a camada rígida.
- Os módulos de resiliência iniciais fornecidos ao programa têm pouca influência nos módulos finais. Entretanto, o número e o tempo de duração das iterações podem variar em função dos

módulos iniciais.

- A análise de múltiplas camadas elásticas implementada no BackMeDiNa é similar à utilizada pelo programa WESLEA.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade do Oeste Paulista, à Universidade Estadual de Londrina pela infraestrutura disponibilizada e à Concessionária Triunfo/Econorte pela disponibilização dos dados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO (2015) *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide – A Manual of Practice*. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington.
- Albernaz, C. A. V.; M. A. Neves e C. Costa (2003) Aplicação Prática da Análise Mecânica de Pavimentos na Rodovia BA-263. *34ª Reunião Anual de Pavimentação*. Campinas.
- ASTM D5858 (2015) *Standard Guide for Calculating In Situ Equivalent Elastic Moduli of Pavement Materials Using Layered Elastic Theory*. American Society for Testing and Materials, USA.
- DNIT (2006) *Manual de pavimentação*. Departamento Nacional De Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro.
- Elshaer, M.; M. Ghayoomi e J. S. Daniel (2018) The role of predictive models for resilient modulus of unbound materials in pavement FWD-deflection assessment. *Road Materials and Pavement Design*, v. 19, n. 1, 1–19.
- Franco, F. A. C. P. e L. M. G. Motta (2018) *Guia para Utilização de Método Mecânico-Empírico – Apresentação dos Programas Desenvolvidos*. Departamento Nacional De Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro.
- Irwin, L.H. (2002) Backcalculation: An overview and perspective. *Proceedings of Pavement Evaluation Conference*. Virginia Institute of Technology. Virginia.
- Kargah-Ostadi, N. e S. M. Stoffels (2015) Backcalculation of Flexible Pavement Structural Properties Using a Restart Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy. *Journal of Computing in Civil Engineering*, v. 29, n. 2, p. 04014035-1 – 04014035-8.
- Koshigoe, A. S. H.; F. C. V. Zanoni; C. A. P. Silva Júnior e H. B. Fontenele (2019) Effect of variation of the average daily volume and traffic growth rate on flexible pavements performance. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, v. 27, n. 1, p. 58–68.
- LTPP (2006) *Guidelines for Review and Evaluation of Backcalculation Results*. Federal Highway Administration. Virginia.
- NCHRP 1- 37A (2004) *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures*. National Cooperative Highway Research Program. Illinois.
- Rakesh, N.; A. K. Jain; M. A. Reddy e K. S. Reddy (2006) Artificial neural networks—genetic algorithm based model for backcalculation of pavement layer moduli. *International Journal of Pavement Engineering*, v. 7, n. 3, p. 221–230.
- Rodrigues, R. L. (2007) Avaliação estrutural de segmento da av. Floriano Peixoto na zona urbana de Campina Grande – PB, Dissertação (Mestrado), 167 f, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Disponível em: <<http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/4046>>.
- Saltan, M.; V. E. Uz e B. Aktas (2012) Artificial neural networks–based backcalculation of the structural properties of a typical flexible pavement. *Neural Computing and Applications*, v. 23, n. 6, p. 1703–1710.
- Terzi, S.; M. Saltan; E. U. Küçüksille e M. Karasahin (2013) Backcalculation of pavement layer thickness using data mining. *Neural Computing and Applications*, v. 23, n. 5, p. 1369–1379.
- Xie, Z.; J. Shen; Z. Guo e L. Cong (2015) Effect of Distresses on Deflection Basins and Backcalculation Modulus of Asphalt Pavement with Cement-Treated Base. *International Journal of Pavement Research and Technology*, v. 8, n. 4, p. 283–288.

Guilherme Crepaldi Camarini (guilherme.camarini@uel.br)

Carlos Alberto Prado da Silva Junior (cprado@uel.br)

Heliana Barbosa Fontenele (heliana@uel.br)

Departamento de Construção Civil, Centro de Tecnologia e Urbanismo, Universidade Estadual de Londrina
Rodovia PR 445, Campus Universitário, Caixa Postal 10.011, CEP: 86057-970, Londrina-PR, Brasil